

УДК 532.783, 535.326, 535,512

ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ДОМЕНОВ, ЗОНДИРУЕМЫХ СФОКУСИРОВАННЫМ ЛАЗЕРНЫМ ЛУЧОМ

© 2017 г. А. М. Паршин***, кандидат физ.-мат. наук

*Институт физики им. Л.В. Киренского, ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск

**Сибирский федеральный университет, Красноярск

E-mail: parshin@iph.krasn.ru

Представлена методика определения оптических характеристик доменных структур нематических жидких кристаллов с использованием сфокусированного лазерного луча. Получены зависимости интенсивности поляризованного света от электрического напряжения для отдельного домена нематика, сформированного поверхностью поликарбоната в присутствии магнитного поля. Показано, что оптические характеристики нельзя интерпретировать в рамках концепции рассеяния света, пригодной для ансамбля доменов, зондируемым широким лазерным лучом. Анализ результатов проведен на основе положений градиентной оптики.

Ключевые слова: лазерное излучение, интенсивность света, интерференция, жидкий кристалл, поликарбонат.

Коды OCIS: 160.3710, 230.3720, 260.3160

Поступила в редакцию _____

Введение

Лазерное излучение, вследствие его высокой монохроматичности и интенсивности, широко используется в жидкокристаллических (ЖК) устройствах оптической обработки информации [1]. Анализ оптического пропускания зондирующего лазерного луча позволяет обнаруживать новые эффекты в ЖК слоях, находящихся под воздействием ориентирующих поверхностей или внешних полей, которые могут быть использованы для создания новых ЖК технологий. В устройствах с однородным слоем ЖК директор изменяется постепенно от точки к точке, и оптические характеристики не зависят от поперечных размеров лазерного луча. В то же время, в неоднородных ЖК структурах получение достоверных оптических характеристик при использовании луча лазера является трудной задачей. К неоднородным структурам можно отнести композитные материалы с объемным расположением капель ЖК в изотропных матрицах [2,3]. Широкий лазерный луч при своем распространении через композит захватывает значительное количество микроскопических объемов ЖК и несет интегральную информацию об их оптических свойствах, к которым можно отнести характеристики рассеяния света и интерференционные эффекты. Анализ оптических характеристик композитов зависит от соотношения диаметров капель d с длиной волны света λ и проводится при $d < \lambda$ в приближении Рэлей-Ганса и при $d > \lambda$ в приближении аномальной дифракции. Так, при исследовании капсулированных в полимерной матрице ЖК капель (КПЖК) диаметром $d \sim 1\text{--}10$ мкм [4,5] в рамках указанных приближений были объяснены результаты изменения оптического пропускания под действием электрических или магнитных полей. Исследования в работе [6] показали, что механизм рассеяния в приближении аномальной дифракции остается справедливым в КПЖК пленках с однослойным расположением капель размером вплоть до $d \sim 25$ мкм. При этом оптические характеристики обуславливались фазовыми соотношениями

света, прошедшего через капли и через полимерную матрицу, то есть отличием показателей преломления ЖК и полимера. Однако для их получения оказалось необходимым использовать параметры, зависящие от размера, формы и внутренней структуры капель ЖК. Недавно нами были обнаружены и исследованы доменные структуры нематических ЖК, сформированные на поверхности поликарбоната (ПК) [7-9]. Домены имеют размеры $d \sim 50\text{--}200$ мкм и очень плотную упаковку на поверхности ПК. Данное обстоятельство затрудняет рассматривать характеристики света, прошедшего через их ансамбли, в рамках указанных приближений. В настоящей статье представлена методика определения оптических характеристик доменных структур ЖК с использованием сфокусированного лазерного луча, способного зондировать отдельные домены. Для анализа оптического пропускания деформированных структур ЖК использовалось электрическое и магнитное поле.

Методика эксперимента

Для получения оптических характеристик отдельного домена ЖК на поверхности ПК была собрана поляризационно-оптическая установка, схема которой представлена на рис. 1. Установка давала возможность пропускать через образец либо белый свет, либо лазерное излучение, и позволяла получать вольт-контрастные характеристики. Белый свет от галогеновой лампы 1, отражаясь от зеркала 2, проходил через полупрозрачную пластинку 3, поляризатор 4, линзу 5, платформу 6 с образцом 7, объектив 8, анализатор 9 и, отклонившись призмой 10, через окуляр 11 попадал в объектив цифровой камеры 12. Горизонтально поляризованный луч He-Ne лазера 13 ЛГН-302 с длиной волны $\lambda = 0.633$ мкм ослаблял свою интенсивность на фильтре 14 и, отражаясь от полупрозрачной пластинки 3, проходил дальнейший путь до объектива камеры так же как пучок белого света. При выведении призмы 10 из оптического тракта лазерный луч попадал на фотодиод 15.

Для фокусировки лазерного луча использовалась собирающая линза с фокусным расстоянием $f = 30$ мм. Известно, что линза не изменяет профиль луча, а изменяет лишь радиус кривизны и размер пятна, если луч является Гауссовым [10]. Профиль лазерного луча определялся с помощью профилометра LBP2 (Newport Corporation). Распределение относительной интенсивности луча I_{rel} (в процентах от максимального значения) в его поперечном сечении, расположенном в фокусе линзы, представлено в сноске (слева) на рис. 1. Из распределения видно, что луч имеет Гауссову форму, а его перетяжка w_0 , в которой радиальная ширина w имеет минимальное значение при $z = 0$, составляет ~ 25 мкм. В сноске (справа) на рис. 1 показан гиперболический контур луча 16, его перетяжка, поверхности постоянной фазы 17, а также энергетический профиль луча 18.

Для создания образца стеклянная пластина с проводящим ИТО покрытием помещалась в центрифугу, и на нее осаждалась капля 2-%-го раствора ПК в CH_2Cl_2 . После центрифугирования в течение нескольких десятков секунд на подложке формировалась пленка ПК, на которую укладывались две тефлоновые прокладки толщиной 30 мкм. На прокладки помещалась стеклянная пластина с ИТО проводящим покрытием, промытая в кипящем ацетоне и кипящем гексане. ЖК 4-*n*-пентил-4'-цианобифенил (5ЦБ) с последовательностью фазовых переходов $\text{Cr}-22^\circ\text{C}-\text{N}-34^\circ\text{C}-\text{I}$ вводился в зазор между пластинами ячейки в нематической фазе. ЖК ячейка помещалась между полюсами электромагнита, и магнитное поле H прикладывалось вдоль плоскости подложки в течение 20 мин. После удаления из магнита с использованием поляризационного микроскопа в образце можно было наблюдать ансамбль доменов ЖК круглой формы с проходящими через их центры вдоль диаметров линиями дисклинаций, перпендикулярными направлению прикладывания H . Полученный образец помещался на платформу, способную перемещаться в трех перпендикулярных направлениях. Перемещаясь в вертикальном направлении, вдоль светового луча, платформа устанавливалась так, чтобы

слой ЖК в ячейке находился в фокусе линзы. Дополнительно платформа перемещалась в горизонтальной плоскости до тех пор, пока центральная область отдельного домена не оказывался на пути лазерного луча. При этом образец устанавливался так, чтобы вектор поляризации световой волны \mathbf{e} был параллелен направлению прикладывания H . С помощью камеры производился снимок. Затем призма и анализатор выводились из оптического тракта, источник белого света выключался, и к ячейке прикладывалось переменное электрическое напряжение U с частотой 1 кГц от генератора 19, которое регистрировалось вольтметром 20. Напряжение от фотодиода, пропорциональное интенсивности лазерного луча I , регистрировалось вольтметром 21. Сигналы от вольтметров через специальную плату поступали на компьютер 22. Цифровая камера также была подключена к компьютеру. С помощью программы LabVIEW прописывалась зависимость $I(U)$. Затем образец поворачивался на 90° для того, чтобы вектор поляризации световой волны \mathbf{e} был перпендикулярен направлению прикладывания H , и вновь регистрировалась кривая $I(U)$.

Результаты и обсуждение

На рис. 2 представлена микрофотография ансамбля доменов 5ЦБ, сформированных на поверхности пленки ПК в присутствии магнитного поля $H = 25$ кЭ. Из рисунка видно, что все линии дисклинаций I ориентированы перпендикулярно направлению H . Данное обстоятельство позволило упростить ориентацию образца в поляризационно-оптической установке в положениях $\mathbf{e} \parallel H$ или $\mathbf{e} \perp H$.

На рис. 3 приведена зависимость $I(U)$ для луча лазера, прошедшего через центр домена, для случая $\mathbf{e} \parallel H$. Зависимость сопровождается интерференционными эффектами после начала трансформации слоя ЖК при монотонном увеличении интенсивности с ростом напряжения вплоть до полей насыщения. На рис. 4 приведена такая же зависимость $I(U)$ для случая

$\mathbf{e} \perp \mathbf{H}$. На кривой также наблюдаются интерференционные изменения интенсивности лазерного излучения, но при ее монотонном уменьшении с ростом напряжения. Следует отметить, что представленные зависимости практически не изменялись при перемещении луча лазера относительно домена, то есть вклад в оптические характеристики от линий дисклинаций был незначителен.

Из анализа зависимостей на рис. 3 и рис. 4 можно сделать следующие заключения. Во-первых, кривые получены в отсутствие анализатора, поэтому они не могут быть интерпретированы на эффекте двулучепреломления ЖК. Во-вторых, оптические характеристики подобны тем, которые были получены для ансамбля доменов, зондируемых широким лазерным лучом [8]. Однако в данном случае они не могут быть объяснены отличием показателей преломления ЖК и полимера, так как весь свет проходит через домен и не захватывает полимерную матрицу. В-третьих, зависимости имеют разный характер при различных направлениях вектора поляризации относительно направления прикладывания магнитного поля \mathbf{H} .

Полученные результаты можно интерпретировать следующим образом. Структура домена ЖК, сформированного поверхностью ПК в присутствии магнитного поля \mathbf{H} [9], представлена на рис. 5. Радиальная конфигурация директора ЖК, сформированная на поверхности ПК, постепенно передается в объем нематического слоя и переходит на длине когерентности ξ в планарную ориентацию. При приложении напряжения U к образцу переориентация молекул нематика под действием электрического поля \mathbf{E} в каждом домене должна привести к изменению угла ориентации директора относительно оси z на длине когерентности ξ_E , а также к неоднородному молекулярному распределению в плоскости xu (рис. 6). Данная трансформация директора ЖК будет сопровождаться стремлением показателя преломления необыкновенного луча n_e к показателю преломления обыкновенного луча n_o на расстоянии ξ_E . Можно предположить, что вследствие неоднородного распределения показателей преломления в

плоскости xy , в домене возникнет эффект градиентной линзы, луч света в которой стремится отклониться в сторону большего показателя преломления [11,12]. При $\mathbf{e} \parallel \mathbf{H}$ линза будет собирающей, а при $\mathbf{e} \perp \mathbf{H}$ рассеивающей. В первом случае будет наблюдаться увеличение (рис. 3), а во втором уменьшение (рис. 4) интенсивности лазерного излучения с ростом напряжения.

Заключение

В настоящей статье представлена методика определения оптических характеристик доменных структур ЖК с использованием сфокусированного лазерного луча, способного зондировать отдельные домены. Оптические характеристики были получены для домена нематика 5CB, сформированного поверхностью поликарбоната в присутствии магнитного поля \mathbf{H} , с помощью поляризационно-оптической установки. Установка позволяла пропускать через образец либо белый свет, либо лазерное излучение; для фокусировки лазерного луча использовалась собирающая линза. Получены зависимости интенсивности I лазерного излучения с вектором поляризации $\mathbf{e} \parallel \mathbf{H}$ или $\mathbf{e} \perp \mathbf{H}$, прошедшего через домен нематика, от напряжения U . Зависимости сопровождаются интерференционными эффектами после начала трансформации слоя ЖК при монотонном увеличении или уменьшении интенсивности с ростом напряжения вплоть до полей насыщения. Данные оптические характеристики оказалось невозможным интерпретировать в рамках концепции рассеяния света, пригодной для ансамбля доменов, зондируемым широким лазерным лучом. Полученные результаты можно объяснить, если предположить, что, вследствие неоднородного распределения показателей преломления в сечении лазерного луча, в домене возникает эффект градиентной линзы, луч света в которой стремится отклониться в сторону большего показателя преломления.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российским Фондом
Фундаментальных Исследований (проекты № 15-02-06924 и № 16-53-00073),
а также за счет проектов СО РАН через комплексные программы № П.2Р
0356-2015-0410 и № 0356-2015-041.

Литература

1. Томилин М.Г., Пестов С.М. Свойства жидкокристаллических материалов. Спб.: Политехника, 2005. 296 с.
2. Drzaic P.S. Polymer dispersed nematic liquid crystal for area displays and light valves // J. Appl. Phys. 1986. V. 60. No 6. P. 2142-2148.
3. West J.L., Doane J.W., Zumer S. Liquid crystal display material comprising a liquid crystal dispersion in a thermoplastic resin // US Patent No 4685771. 1987.
4. Zumer S., Doane J.W. Light scattering from a small nematic droplet // Phys. Rev. A. 1986. V. 34. P. 3373–3386.
5. Zumer S. Light scattering from nematic droplet: Anomalous-diffraction approach // Phys. Rev. A. 1988. V. 37. P. 4006–4015.
6. Конколович А.В., Пресняков В.В., Зырянов В.Я., Лойко В.А., Шабанов В.Ф. Интерференционное гашение света, проходящего через монослойную пленку капсулированных полимером нематических жидких кристаллов // ЖЭТФ. 2000. Т. 71. № 12. С. 710-713.
7. Parshin A.M., Gunyakov V.A., Zyryanov V.Ya., Shabanov V.F. Domain structures in nematic liquid crystals on the polycarbonate surface // Int. J. Mol. Sci. V. 14, 2013. P. 16303-16320.
8. Parshin A.M., Zyryanov V.Ya., Shabanov V.F. Electric and magnetic field-assisted orientational transitions in the ensembles of domains in a nematic liquid crystal on the polymer surface // Int. J. Mol. Sci. 2014. V. 15. P. 17838-17851.
9. Parshin A.M., Zyryanov V.Ya., Shabanov V.F. The director field distribution with the strongly pinned alignment in nematic structures at the polymer surface // Liq. Cryst. 2015. V. 42. P. 57-64.

10. Гончаренко А.М. Гауссовы пучки света. М.: КомКнига, 2005. 144 с.
11. Presnyakov V., Asatryan K., Tork A., Galstyan T., Chigrinov V. Optical polarization grating induced liquid crystal micro-structure using azo-dye command layer // Opt. Express. 2006. V. 14. 10558-10564.
12. Sova O., Reshetnyak V., Galstian T., Asatryan K. Electrically variable liquid crystal lens based on the dielectric dividing principle // J. Opt. Soc. Am. A. 2015. V. 32. P. 803–808.

Подписи к рисункам

Рис. 1. Схема поляризационно-оптической установки для определения оптических характеристик света, проходящего через отдельный домен ЖК на поверхности ПК. 1 – лампа, 2 – зеркало, 3 – полупрозрачная пластинка, 4 – поляризатор, 5 – линза, 6 – платформа, 7 – образец, 8 – объектив, 9 – анализатор, 10 – призма, 11 – окуляр, 12 – цифровая камера, 13 – лазер, 14 – фильтр, 15 – фотодиод. В сноске показаны профиль (слева) и структура лазерного луча (справа). $I_{\text{отн}}$ – относительная интенсивность, x – расстояние от центральной оси z в поперечном сечении, 16 – гиперболический контур, w_0 – перетяжка, 17 – поверхности постоянной фазы, 18 – энергетический профиль.

Рис. 2. Микрофотография ансамбля доменов 5ЦБ, сформированных на поверхности пленки ПК в присутствии магнитного поля $H = 25$ кЭ. 1 – отдельный домен, 2 – линия дисклинации, 3 – пятно лазерного луча. Направления поляризации белого света показаны пересекающимися стрелками.

Рис. 3. Зависимость (во вставке в увеличенном масштабе) интенсивности I лазерного излучения с вектором поляризации $e \parallel H$, прошедшего через центр домена 5ЦБ, сформированного на поверхности ПК, от напряжения U .

Рис. 4. Зависимость (во вставке в увеличенном масштабе) интенсивности I лазерного излучения с вектором поляризации $e \perp H$, прошедшего через центр домена 5ЦБ, сформированного на поверхности ПК, от напряжения U .

Рис. 5. Структура ансамбля доменов ЖК, сформированных поверхностью ПК в присутствии магнитного поля H . 1 – радиальная структура на пленке ПК,

2 – линия дисклинации, 3 – структура переходного слоя на расстоянии z от поверхности, 4 – планарная ориентация ЖК на длине когерентности ξ .

Рис. 6. Структура ансамбля доменов ЖК, сформированных поверхностью ПК, переориентированных под действием электрического поля E . 1 – радиальная структура на пленке ПК, 2 – линия дисклинации, 3 – структура переходного слоя на расстоянии z от поверхности, 4 – гомеотропная ориентация ЖК на длине когерентности ξ_E .

Паршин Александр Михайлович,
Институт физики им. Л.В. Киренского,
660036, Академгородок 50, стр. 38, Красноярск,
с.т. 7(391) 249-46-00
д.т. 7(391) 249-55-27
факс 7(391) 243-89-23
e-mail parshin@iph.krasn.ru